

高压物理学报

无机盐对硝酸铵溶解温度和膨化硝酸铵炸药爆炸性能的影响

李炎 崔晓荣 李瑞 汪泉 胡明航 孙瑞 陈雅静

Influence of Inorganic Salts on the Dissolution Temperature of Ammonium Nitrate and the Explosive Performance of Expanded Ammonium Nitrate Explosives

LI Yan, CUI Xiaorong, LI Rui, WANG Quan, HU Minghang, SUN Rui, CHEN Yajing

引用本文:

李炎, 崔晓荣, 李瑞, 等. 无机盐对硝酸铵溶解温度和膨化硝酸铵炸药爆炸性能的影响[J]. 高压物理学报, 2025, 39(4):045102. DOI: 10.11858/gywlxb.20240914

LI Yan, CUI Xiaorong, LI Rui, et al. Influence of Inorganic Salts on the Dissolution Temperature of Ammonium Nitrate and the Explosive Performance of Expanded Ammonium Nitrate Explosives[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(4):045102. DOI: 10.11858/gywlxb.20240914

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20240914>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水含量对多孔粒现场混装铵胺炸药性能的影响

Effect of Water Content on the Performance of Porous Granular Ammonium Nitrate On-Site Mixed Ammonium Amine Explosive
高压物理学报. 2025, 39(3): 031302 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20240885>

低温环境对乳化炸药爆炸性能的影响

Effect of Low Temperature Environments on the Explosive Properties of Emulsion Explosives
高压物理学报. 2024, 38(4): 045201 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20240712>

六亚甲基四胺含量对铵胺炸药性能的影响

Effect of Hexamethylenetetramine Content on the Performance of Ammonium-Amine Explosives
高压物理学报. 2023, 37(5): 055201 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230691>

甲酸铵含量对现场混装乳胶基质流变及热分解性能的影响

Influence of Ammonium Formate Content on Rheological and Thermal Decomposition Properties of On-Site Mixed Emulsion Matrix
高压物理学报. 2025, 39(1): 011302 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20240845>

模拟高原环境下敏化方式对乳化炸药爆轰性能的影响研究

Effect of Aensitization Methods on Detonation Performance of Emulsion Explosive in Simulated Plateau Environment
高压物理学报. 2024, 38(4): 045202 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230838>

装药方式对铜/钢爆炸焊接界面波的影响及波形成机理

Effect of Charge Mode on Interface Wave of Copper/Steel Explosive Welding and Wave Formation Mechanism
高压物理学报. 2020, 34(2): 025203 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190844>

无机盐对硝酸铵溶解温度和膨化硝酸铵炸药爆炸性能的影响

李炎¹, 崔晓荣^{1,2}, 李瑞^{1,2}, 汪泉¹, 胡明航¹, 孙瑞¹, 陈雅静¹

(1. 安徽理工大学化工与爆破学院, 安徽 淮南 232001;

2. 宏大民爆集团有限公司, 广东 广州 510623)

摘要: 为了探究无机盐对硝酸铵溶解温度和膨化硝酸铵炸药爆炸性能的影响, 分别添加不同质量分数(2%、4%和6%)的NaCl、KCl、NaNO₃和KNO₃ 4种无机盐取代膨化硝酸铵炸药中的硝酸铵, 测得了硝酸铵溶解温度和膨化硝酸铵炸药爆炸性能(爆速、猛度、做功能力)的影响。结果表明: 添加无机盐质量分数为2%时, 改良炸药较传统膨化硝酸铵配方炸药的溶解温度降低了8~12℃; 添加NaNO₃和KNO₃的膨化硝酸铵炸药较传统配方炸药的爆速提高了120~150 m/s, 添加NaCl和KCl的膨化硝酸铵炸药降低了150~850 m/s; 添加NaNO₃和KNO₃的膨化硝酸铵炸药铅柱压缩量较传统配方增大了0.62~1.90 mm, 添加NaCl和KCl的铅柱压缩量降低了0.06~2.55 mm; 添加NaNO₃和KCl的炸药超压峰值提高了0.02~0.78 kPa, 添加NaCl和KNO₃的炸药超压峰值降低了5.02~19.57 kPa。无机盐的质量分数每提高2%, 溶解温度降低7~10℃, 爆速降低100~300 m/s, 铅柱压缩量缩小0.08~0.73 mm, 超压峰值降低1.77~13.50 kPa。实际操作中, 可以在膨化硝酸铵炸药中添加少量NaNO₃, 这样既有利于降低硝酸铵的溶解温度, 同时有利于提高炸药的爆炸性能。

关键词: 膨化硝酸铵炸药; 无机盐; 工业生产; 溶解温度; 爆炸性能

中图分类号: O389; TJ55; O521.9

文献标志码: A

工业炸药作为工程爆破中不可或缺的动力源泉, 其重要性不言而喻, 被誉为“能源基石”^[1-3]。膨化硝酸铵炸药是一种性能优异且经济实用的工业炸药, 具有敏化作用强、威力高、成本低、易实现连续生产等优点。然而, 这类炸药在生产过程中往往伴随着高温条件下硝酸铵(ammonium nitrate, AN)的快速结晶, 存在安全隐患。为了提高工业炸药的生产安全性, 降低硝酸铵的溶解温度是一种有效途径^[4]。因此, 有必要探索改性硝酸铵性能, 降低其溶解温度。

目前, 学者们对硝酸铵的改性进行了相关研究。例如, 孙占辉等^[5]通过研究无机酸对硝酸铵热分解的作用机理, 发现硝酸铵在酸性物质的介入下会增大热分解速率。王志荣等^[6]利用差热分析法揭示了无机盐对硝酸铵热分解行为的调控作用, 特别是KCl的加入显著促进了硝酸铵的热分解过程, 展现了无机盐作为改性剂的潜力。白燕^[7]则通过加速度量热法揭示了氯离子对硝酸铵热分解的抑制作用, 为硝酸铵的改性提供了新的视角。曹会琦^[8]系统研究了不同卤化钠类及农用化肥类物质对硝酸铵热分解特性的影响。目前的研究主要集中于无机盐对硝酸铵的改性, 而无机盐对膨化硝酸铵炸药性能的影响研究较少。

* 收稿日期: 2024-10-17; 修回日期: 2024-11-16

基金项目: 安徽省高等学校科学研究重点项目(2023AH051221); 安徽省自然科学基金(2208085QA26); 安徽理工大学博士引进人才基金项目

作者简介: 李炎(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事工业炸药爆炸性能研究. E-mail: 1600875637@qq.com

通信作者: 李瑞(1987—), 男, 博士, 讲师, 主要从事含能材料点火、起爆技术及高效毁伤与终点效应研究. E-mail: lirui_89@126.com

本研究采用无机盐(NaCl 、 KCl 、 NaNO_3 和 KNO_3)部分替代硝酸铵,探究无机盐添加后硝酸铵溶解温度的变化规律,并评估改性膨化硝酸铵炸药的爆炸性能,为膨化硝酸铵炸药的生产实践提供参考。

1 实 验

1.1 材料及仪器设备

实验材料: 硝酸铵、无机盐(NaCl 、 KCl 、 NaNO_3 和 KNO_3)、复合油相、木粉、国标铅柱。

实验设备: BSW-3A 型智能五段爆速仪(湖南湘西州奇搏矿山仪器厂)、YE5853 型电荷放大器(江苏联能电子技术有限公司)、CY-YD-202 压电式压力传感器(江苏联能电子技术有限公司)、HDO4104A 型示波器(美国力科公司)。

1.2 改性膨化硝酸铵炸药的制备

改性膨化硝酸铵炸药中硝酸铵的质量分数为 86%、88% 和 90%,无机盐(NaCl 、 KCl 、 NaNO_3 和 KNO_3)的质量分数(ω)为 2%、4% 和 6%,复合油相的质量分数为 4%,木粉的质量分数为 4%。制备流程如图 1 所示。

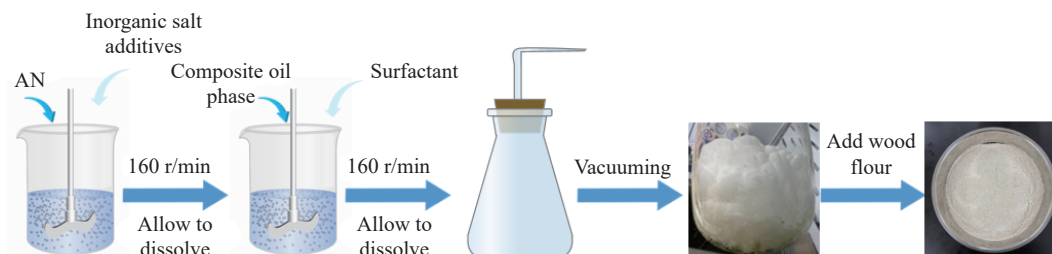


图 1 改性膨化硝酸铵炸药的制备流程

Fig. 1 Preparation process of modified expanded ammonium nitrate explosive

改性膨化硝酸铵炸药的制备步骤:

- (1) 120 °C 加热条件下,将一定比例的固体硝酸铵和无机盐同时加入占炸药质量分数 9.2% 的水中,搅拌至完全溶解;
- (2) 待固态硝酸铵和无机盐完全溶解,加入质量分数为 4% 的复合油相,搅拌至完全溶解后,得到改性膨化硝酸铵水溶液;
- (3) 在真空度为 0.09 MPa 的条件下,使改性膨化硝酸铵水溶液膨化;
- (4) 取出粉状炸药进行冷却,研磨后过 20 目筛;
- (5) 加入质量分数为 4% 的木粉充分混合,制成改性膨化硝酸铵炸药,测试其爆炸性能。

1.3 改性膨化硝酸铵炸药性能测试

1.3.1 溶解温度测试

将温度计插入改性膨化硝酸铵水溶液中,记录固态硝酸颗粒全部溶解时的温度。

1.3.2 爆速测试

依照 GB/T 13228—2015:《工业炸药爆速测定方法》^[9],使用爆速测试仪进行改性膨化硝酸铵炸药的爆速测试。具体操作:用外径 32 mm、长度 400 mm 的牛皮纸管装药,将 3 根探针插入药卷,探针间距为 50 mm,测量 2 段爆速,取平均值。各组实验均重复 3 次,取平均值。

1.3.3 猛度测试

依照 GB/T 12440—1990:《炸药猛度实验 铅柱压缩法》^[10],进行炸药猛度测试。称取 50 g 改性膨化硝酸铵炸药,放置于纸筒中并压实,密度为 $(1.00 \pm 0.03) \text{ g/cm}^3$ 。将 $\varnothing 40 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 的铅柱、钢片和药卷按顺序固定,将雷管插入药品中,插入深度为 15 mm。在铅柱一端面处,经过圆心用铅笔轻轻画十字线,

并注明四线序号。在十字线距交点 10 mm 处,再标注交叉短线,用游标卡尺沿十字线依次测量铅柱高度,测量时游标卡尺应伸到交叉短线处。取 4 次测量的算术平均值作为实验前铅柱高度的平均值。通过比较起爆前后铅柱的高度差获得炸药的猛度。每个试样重复 3 次实验,取平均值。

1.3.4 超压测试

测试样品为 40 g 球形装药,装填密度为 0.60 g/cm^3 。测试传感器位于距球形药包中心 70 cm 处。对示波器测得的数据进行处理,得到爆炸冲击波的压力-时程曲线,对压力-时程曲线进行积分,计算获得冲击波超压和最大冲量。每个试样重复 3 次平行实验,取平均值。

2 结果与讨论

2.1 炸药参数的理论计算

2.1.1 氧平衡

氧平衡(oxygen balance, OB)是指当炸药爆炸生成碳、氢氧化物时氧的剩余量。传统膨化硝酸铵炸药的氧化剂为自敏化的膨化硝酸铵,可燃剂由木粉和复合油相构成,三者按照质量比 92 : 4 : 4 构成微负氧(OB 为 -0.0084 g/g)炸药^[11-12]。根据氧平衡理论进行计算,得到不同质量分数、不同无机盐改性膨化硝酸铵炸药的氧平衡情况,见表 1。

表 1 不同质量分数、不同无机盐改性膨化硝酸铵炸药的氧平衡
Table 1 Oxygen balance of expanded ammonium nitrate explosive modified by inorganic salt composition with different mass fractions

Composition	OB/($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)		
	$\omega=2\%$	$\omega=4\%$	$\omega=6\%$
NaNO_3	-0.003 0	0.002 4	-0.003 0
KNO_3	-0.004 5	-0.000 6	-0.004 5
KCl	-0.012 4	-0.016 4	-0.012 4
NaCl	-0.012 4	-0.016 4	-0.012 4

由表 1 中的计算结果可知:对于加入 NaCl 和 KCl 后的改性膨化硝酸铵炸药,氧平衡随着无机盐含量的增加而降低,呈现负氧平衡;对于加入 NaNO_3 和 KNO_3 后的改性膨化硝酸铵炸药,氧平衡随着无机盐含量的增加而增加,从负氧平衡逐渐转变为正氧平衡。

2.1.2 爆热

同样,通过爆热理论计算公式计算得到不同质量分数、不同无机盐改性膨化硝酸铵炸药的爆热,结果见表 2。

表 2 不同质量分数、不同无机盐改性膨化硝酸铵炸药的爆热
Table 2 Detonation heat of inorganic salt-modified expanded ammonium nitrate explosives with different mass fractions and components

Composition	Detonation heat/($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)		
	$\omega=2\%$	$\omega=4\%$	$\omega=6\%$
NaNO_3	3 696.86	3 564.76	3 375.36
KNO_3	3 728.61	3 562.03	3 371.26
KCl	3 688.90	3 586.73	3 484.56
NaCl	3 688.90	3 586.73	3 484.56

通过表 2 可知: 加入 2%、4% 和 6% NaNO_3 的改性膨化硝酸铵炸药的爆热比传统配比硝酸铵炸药的爆热(3791.07 kJ/mol)分别降低了 2.5%、6.0% 和 11.0%; 加入 2%、4% 和 6% KNO_3 的膨化硝酸铵炸药爆热比传统配比爆热分别降低了 1.7%、6.0% 和 11.1%; NaNO_3 和 KNO_3 2 种无机盐改性膨化硝酸铵炸药的爆热差别不大。加入 2%、4%、6% KCl (或 NaCl)改性膨化硝酸铵炸药的爆热分别比传统配比爆热降低了 2.7%、5.5% 和 8.1%。采用 Brinkley-Wilson 方法计算爆热时, 因为 KCl 和 NaCl 作为惰性物质不参与爆炸反应, 所以相同质量分数 KCl 和 NaCl 改性膨化硝酸铵炸药的爆热变化相同。

2.2 改性硝酸铵溶解温度

记录不同质量分数无机盐改性硝酸铵溶液完全溶解时的温度, 结果见表 3, 可以看出: 无机盐的质量分数为 2% 时, 较传统配方炸药的硝酸铵溶解温度(120~140 $^{\circ}\text{C}$)降低了 8~12 $^{\circ}\text{C}$, 无机盐质量分数每提高 2%, 膨化硝酸铵炸药的硝酸铵溶解温度降低 7~10 $^{\circ}\text{C}$, 其中通过 KNO_3 降低改性硝酸铵溶解温度的效果最好。

表 3 不同质量分数、不同无机盐改性膨化硝酸铵炸药完全溶解时的温度
Table 3 Temperature when inorganic salt modified expanded ammonium nitrate explosives
with different mass fractions and components are completely dissolved

Composition	Temperature/ $^{\circ}\text{C}$		
	$\omega=2\%$	$\omega=4\%$	$\omega=6\%$
NaNO_3	112	105	95
KNO_3	110	100	90
KCl	110	102	92
NaCl	108	101	95

在硝酸铵中添加 KNO_3 和 NaNO_3 时溶液中含有 K^+ 、 Na^+ 和 NO_3^- 离子, K^+ 和 Na^+ 离子通过离子间的相互作用(如离子对的形成、溶剂化壳层的改变)影响 NH_4^+ 和 NO_3^- 在溶液中的行为, 改变了硝酸铵的溶解度^[13]和结晶动力学^[14], 进而降低了硝酸铵的溶解温度; 炸药中加入 NaCl 和 KCl 后电离产生 Na^+ 、 K^+ 和 Cl^- 离子, 改变了溶液的离子强度和离子平衡, 其中 Cl^- 离子^[15-16]还会通过电荷分布影响硝酸铵的结晶行为, 从而达到降低硝酸铵溶解温度的效果。

2.3 爆炸性能

2.3.1 爆速

实验测得不同配比改性膨化硝酸铵炸药的爆速, 结果见表 4。由表 4 可知, NaCl 、 KCl 、 NaNO_3 和 KNO_3 改性膨化硝酸铵炸药的爆速随着无机盐质量分数的增加而降低。

表 4 不同配比改性膨化硝酸铵炸药的爆速
Table 4 Detonation velocity for each ratio of explosives

Composition	Detonation velocity/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)			Error of detonation velocity/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		
	$\omega=2\%$	$\omega=4\%$	$\omega=6\%$	$\omega=2\%$	$\omega=4\%$	$\omega=6\%$
NaNO_3	2983.29	2666.67	2364.18	45.36	56.38	49.65
KNO_3	2981.52	2665.44	2393.90	60.49	62.68	52.89
KCl	2708.51	2468.60	2156.15	43.59	75.81	38.54
NaCl	1999.20	1786.99	1667.33	61.56	52.56	54.87

与传统配方膨化硝酸铵炸药的爆速(2850 m/s)相比, 在添加无机盐的质量分数为 2% 的情况下, 添加 NaNO_3 、 KNO_3 的膨化硝酸铵炸药爆速提高了 5% 左右, 而添加 KCl 和 NaCl 的膨化硝酸铵炸药的爆速分别降

低了 5% 和 30%。这说明添加 2% 的 NaNO_3 和 KNO_3 有助于爆轰传播, 而添加 2% 的 KCl 和 NaCl 则抑制爆轰反应的发生, 其中添加 2% 的 NaCl 的抑制效果最强。添加质量分数为 4% 的无机盐的情况下, 与添加 2% 无机盐的各配方爆速相比, 添加 NaCl 、 KCl 、 NaNO_3 和 KNO_3 的膨化硝酸铵炸药爆速均降低了 250 m/s 左右。添加质量分数为 6% 的无机盐的情况下, 与添加 4% 无机盐的各配方爆速相比, 添加 NaCl 、 KCl 、 NaNO_3 和 KNO_3 的膨化硝酸铵炸药爆速降低了 200 m/s 左右。上述结果说明, 提高 NaCl 、 KCl 、 NaNO_3 和 KNO_3 添加剂的质量分数可抑制膨化硝酸铵炸药的爆轰反应。

2.3.2 猛 度

炸药的猛度反映了炸药爆炸时爆炸产物对周围介质的破坏作用, 通常用铅柱的压缩量表示。通过猛度测试, 得到各配比炸药爆炸后的典型铅柱压缩情况, 如图 2 所示。

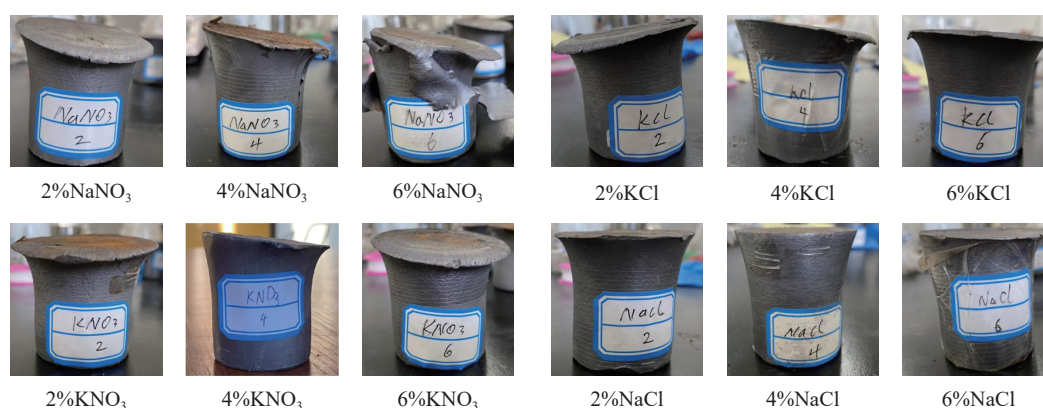


图 2 各配比炸药爆炸后铅柱的压缩情况

Fig. 2 Compression of lead columns after explosion of each ratio of explosives

如图 3 所示, 实验测得不同配方改性膨化硝酸铵炸药的铅柱压缩量, 可以发现, 改性膨化炸药的猛度随着添加 NaCl 、 KCl 、 NaNO_3 和 KNO_3 无机盐质量分数的增加而减小。

从图 3 可以看出, 与传统配方的铅柱压缩量 10.98 mm 相比, 在无机盐添加量为 2% 的情况下, 添加 NaNO_3 和 KNO_3 的膨化硝酸铵炸药的铅柱压缩量增大了 0.7 mm 左右, 添加 KCl 和 NaCl 时铅柱压缩量分别下降了 0.08 和 2.55 mm。其中, 添加 NaCl 对膨化硝酸铵炸药猛度的影响较大, 说明与 KCl 相比, NaCl 通过吸附和破坏自由基的方式对燃烧爆轰链式反应^[13-16]的抑制作用更强。随着 NaNO_3 、 KNO_3 、 KCl 和 NaCl 质量分数的增大, 其铅柱压缩量呈下降趋势, 说明继续添加 NaNO_3 、 KNO_3 、 KCl 和 NaCl 可降低膨化硝酸铵炸药爆炸时爆炸产物对周围介质的破坏作用。

2.3.3 冲击波超压

空中爆炸实验可以测试冲击波超压和计算冲量等参数, 用于研究冲击波超压随时间变化的关系。由示波器储存的电压-时间曲线得到爆炸冲击波典型的压力-时程曲线, 如图 4 所示。

每种试样做 3 次平行实验, 取平均值, 并记录冲击波超压峰值和最大冲量, 见表 5 和表 6。由图 4、表 5 和表 6 可知, 除添加 NaNO_3 和 KCl 的膨化硝酸铵炸药外, 其余配比膨化硝酸铵炸药的超压峰值和最大冲量均低于传统配方膨化硝酸铵的超压峰值 (70.17 kPa) 和最大冲量 (13.02 Pa·s), 且随着无机盐质量分数的增加而逐渐降低, 即炸药的做功能力随着无机盐含量的增加而逐渐降低。

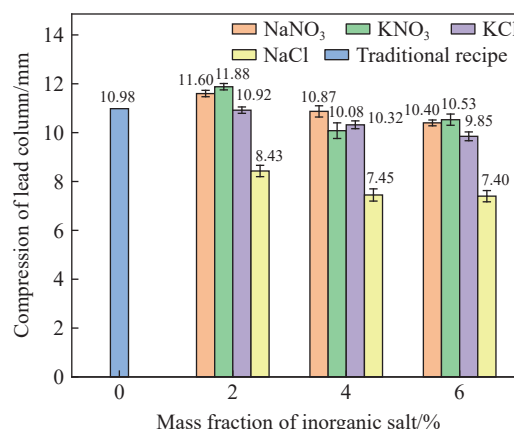


图 3 各配方炸药作用下铅柱的压缩量

Fig. 3 Compression of lead columns of each formula

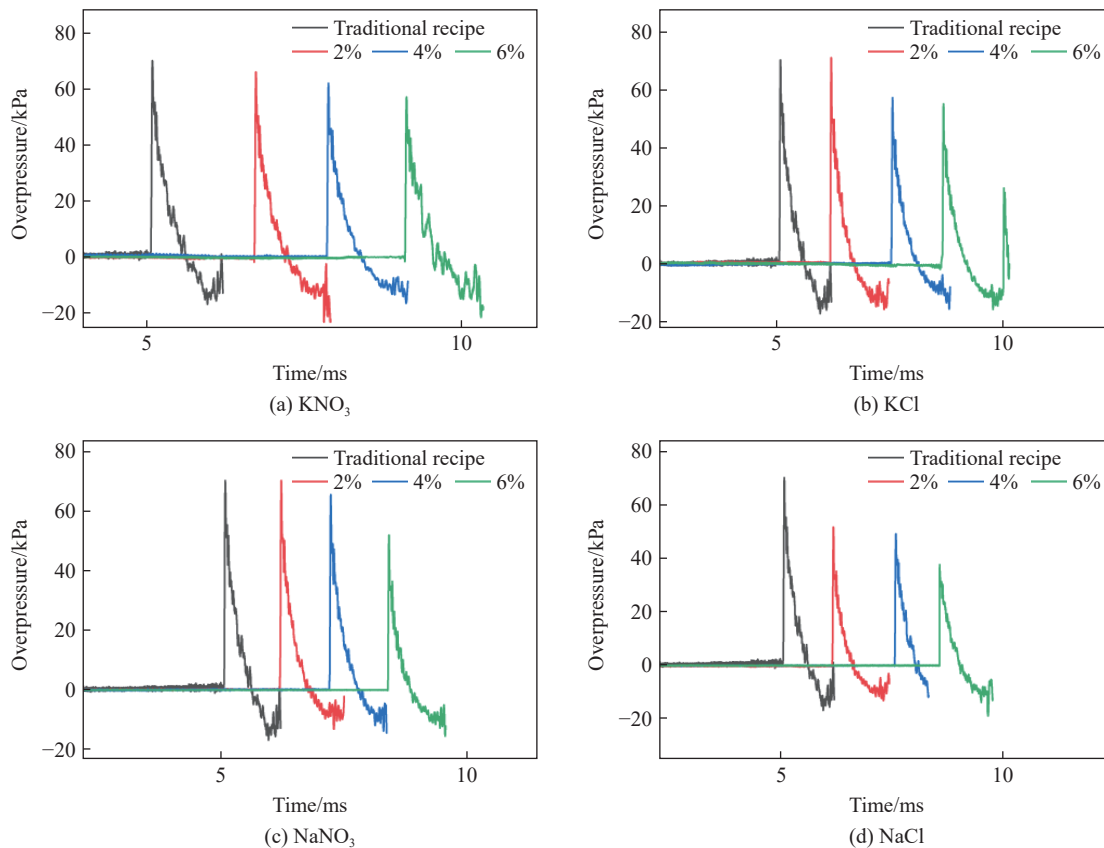


图 4 添加不同质量分数无机盐炸药的超压对比

Fig. 4 Comparison of overpressure of inorganic salt explosives with different mass fractions

表 5 各配比膨化硝酸铵炸药的超压峰值

Table 5 Overpressure peak of each ratio of expanded ammonium nitrate explosives

Composition	Overpressure peak/kPa			Error of overpressure peak/kPa		
	$\omega=2\%$	$\omega=4\%$	$\omega=6\%$	$\omega=2\%$	$\omega=4\%$	$\omega=6\%$
NaNO ₃	70.19	65.44	51.91	0.76	0.85	0.72
KNO ₃	66.15	62.13	57.17	1.02	0.68	0.81
KCl	70.95	57.22	55.11	0.83	1.16	0.89
NaCl	51.70	49.43	37.67	0.68	0.77	0.68

表 6 各配比膨化硝酸铵炸药的最大冲量

Table 6 Maximum impulse of each ratio of expanded ammonium nitrate explosives

Composition	Maximum impulse/(Pa·s)			Error of maximum impulse/(Pa·s)		
	$\omega=2\%$	$\omega=4\%$	$\omega=6\%$	$\omega=2\%$	$\omega=4\%$	$\omega=6\%$
NaNO ₃	13.08	12.19	11.35	0.33	0.13	0.12
KNO ₃	12.95	11.29	10.86	0.08	0.29	0.09
KCl	11.88	11.26	10.86	0.19	0.16	0.14
NaCl	10.70	9.86	8.85	0.09	0.09	0.18

当无机盐质量分数为 2% 时, 添加 NaNO₃ 和 KCl 的膨化硝酸铵炸药的超压峰值较传统配方分别提高了 0.02 和 0.78 kPa, 添加 KNO₃ 和 NaCl 的膨化硝酸铵炸药的超压峰值分别降低了 5.02 和 19.57 kPa。其中, NaCl 对超压峰值的影响最大, 说明 NaCl 对炸药爆炸做功能力的影响最大。NaCl、KCl、KNO₃ 和

NaNO_3 的质量分数每提高 2%, 超压峰值下降 1.77~13.50 kPa, 说明随着无机盐质量分数的增加, 硝酸炸药的做功能力呈下降趋势。

对比不同质量分数 NaCl 、 KCl 和 KNO_3 对膨化硝酸炸药爆炸性能和硝酸铵溶解温度的影响, 发现当添加 NaNO_3 的质量分数为 2% 时, 炸药的溶解温度较传统配方降低了 8 $^{\circ}\text{C}$, 爆速提高了 120 m/s, 铅柱压缩量增大了 0.62 mm, 超压峰值提高了 0.78 kPa, 其中爆炸性能的提高和硝酸铵溶解温度的降低最为明显。因此, 在实际操作中, 可以在膨化硝酸炸药中添加少量 NaNO_3 , 既有利于降低硝酸铵溶解温度, 还能提高炸药的爆炸性能。

3 结 论

(1) 当添加 NaNO_3 和 KNO_3 的质量分数为 2% 时, 膨化硝酸炸药的爆速较传统配方提高了 4.2%~5.2%, 铅柱的压缩量增大了 6.37%。随着 NaCl 、 KCl 、 KNO_3 和 NaNO_3 添加量逐渐增加, 爆速和铅柱的压缩量呈下降趋势。其中, NaCl 对炸药爆速和猛度的影响较大, 对炸药的爆轰反应有明显抑制效果, 说明随着无机盐添加量的增加, 其做功能力呈下降趋势。仅当添加 KCl 的质量分数为 2% 时, 膨化硝酸炸药的超压峰值增大了 1.2%。随着 NaCl 、 KCl 、 KNO_3 和 NaNO_3 添加量的逐渐增加, 其超压峰值呈逐渐下降趋势。

(2) 用 NaCl 、 KCl 、 NaNO_3 和 KNO_3 4 种无机盐取代部分硝酸铵, 可以降低膨化硝酸炸药的溶解温度。添加无机盐的质量分数每增加 2%, 膨化硝酸炸药的溶解温度降低 7~10 $^{\circ}\text{C}$ 。其中, KNO_3 作为添加剂时, 降低溶解温度的效果最好; 当添加无机盐的质量分数为 6% 时, 与原配方膨化硝酸炸药相比, 溶解温度降低了 30 $^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 膨化硝酸炸药中添加少量 NaNO_3 , 既有利于降低硝酸铵的溶解温度, 还能提高炸药的爆炸性能。

参考文献:

- [1] HE Z W, LI Y Y, YU Y K, et al. Preparation and performance of ANPyO/emulsion explosive composite energetic system [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2022, 47(11): e202200121.
- [2] ZHANG K M, ZHAO H R. Perspectives in the stability of emulsion explosive [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2022, 307: 102745.
- [3] CHOU J P, MA H H, WANG Y X, et al. Effect of hydrogen-storage pressure on the detonation characteristics of emulsion explosives sensitized by glass microballoons [J]. *Defence Technology*, 2022, 18(5): 747–754.
- [4] 孙彦臣, 黄文尧, 梁昊, 等. 硝酸铵细度对铵胺炸药性能的影响 [J]. *火灾药学报*, 2024, 47(4): 316–323.
SUN Y C, HUANG W Y, LIANG H, et al. Effect of fineness of ammonium nitrate on properties of ammonium amine explosive [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2024, 47(4): 316–323.
- [5] 孙占辉, 孙金华, 邵荃. 盐酸对硝酸铵热分解的影响 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2006, 36(4): 370–373.
SUN Z H, SUN J H, SHAO Q. On the decomposition of AN catalyzed by HCl [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2006, 36(4): 370–373.
- [6] 王志荣, 胡园园, 吴倩. 敞开气氛中硝酸铵热分解过程危险特性的实验研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2010, 6(1): 49–53.
WANG Z R, HU Y Y, WU Q. Experimental study on hazard characteristics during thermal decomposition process of ammonium nitrate in opened atmosphere [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2010, 6(1): 49–53.
- [7] 白燕. 硝酸铵水溶液热稳定性研究 [J]. *工业安全与环保*, 2009, 35(8): 4–6.
BAI Y. Study of the thermal stability of ammonium nitrate in aqueous solution [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2009, 35(8): 4–6.
- [8] 曹会琦. 不同种类添加剂对硝酸铵热分解动力学及热危险性的影响研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.

- CAO H Q. Research on the effect of different kinds of additives on the thermal decomposition kinetics and thermal risk of ammonium nitrate [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 工业炸药爆速测定方法: GB/T 13228—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method of detonation velocity for industrial explosive: GB/T 13228—2015 [S]. Beijing: China Standard Press, 2015.
- [10] 国家技术监督局. 炸药猛度试验 铅柱压缩法: GB/T 12440—1990 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1990.
- The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Explosive-determination of brisance-lead cylinder compression test: GB/T 12440—1990 [S]. Beijing: China Standard Press, 1990.
- [11] 张立, 吴红波. 爆破器材测试技术 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2018.
- ZHANG L, WU H B. Explosive materials testing technology [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2018.
- [12] 吕春绪, 刘祖亮, 陆明, 等. 工业炸药理论 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003.
- LYU C X, LIU Z L, LU M, et al. Industrial explosive theory [M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2003.
- [13] 陆明. 工业炸药配方设计 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.
- LU M. Industrial explosive formula design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2022.
- [14] 张为鹏, 张亦安, 赵省向. 杂质的影响及硝酸铵生产中爆炸事故的预防 [J]. 化肥工业, 2000, 27(1): 40–42, 63.
- ZHANG W P, ZHANG Y A, ZHAO S X. Effect of impurities and prevention of explosion accident in production of ammonium nitrate [J]. *Chemical Fertilizer Industry*, 2000, 27(1): 40–42, 63.
- [15] 赵东风, 彭力, 王文东. 无机添加剂对硝酸铵拒爆性的影响研究 [J]. 燃料化学学报, 2006, 34(1): 113–116.
- ZHAO D F, PENG L, WANG W D. Effects of inorganic additives on the misfire of modified ammonium nitrate [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2006, 34(1): 113–116.
- [16] 夏良洪. 典型添加剂对硝酸铵基础性能的影响研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- XIA L H. The effect of typical additives on the basis performance of ammonium nitrate [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2015.

Influence of Inorganic Salts on the Dissolution Temperature of Ammonium Nitrate and the Explosive Performance of Expanded Ammonium Nitrate Explosives

LI Yan¹, CUI Xiaorong^{1,2}, LI Rui^{1,2}, WANG Quan¹, HU Minghang¹, SUN Rui¹, CHEN Yajing¹

(1. School of Chemical and Blasting Engineering, Anhui University of Science and Technology,
Huainan 232001, Anhui, China;

2. Hongda Civil Explosives Group Co., Ltd., Guangzhou 510623, Guangdong, China)

Abstract: In order to explore the influence of inorganic salts on the dissolution temperature of ammonium nitrate and the explosive performance of expanded ammonium nitrate explosives, the inorganic salts of 2%, 4% and 6% of NaCl, KCl, NaNO₃ and KNO₃ respectively were used to replace the ammonium nitrate content in the expanded ammonium nitrate explosives, and the explosion performance (including the detonation velocity, the fierceness, and the work ability were measured). The results show that when the mass fraction of inorganic salt is 2%, the dissolution temperature is 8 to 12 °C lower than that of the traditional puffed ammonium nitrate formula explosives; the expanded ammonium nitrate explosives with NaNO₃ and KNO₃ is

120–150 m/s higher than the traditional formula, and NaCl and KCl are reduced by 150–850 m/s; lead column compression of NaNO_3 and KNO_3 increased by 0.62–1.90 mm, and NaCl and KCl decreased by 0.06–2.55 mm; the peak overpressure of NaNO_3 and KCl increased by 0.02–0.78 kPa, and NaCl and KNO_3 inorganic salts decreased by 5.02–19.57 kPa. For every 2% increase in the mass fraction of inorganic salt substitution, the dissolution temperature decreases by 7 to 10 °C; the detonation velocity decreases by 100 to 300 m/s; lead column compression decreases by 0.08 to 0.73 mm; and the peak overpressure decrease by 1.77 to 13.5 kPa. In practice, a small quantity of NaNO_3 can be added to the expanded ammonium nitrate explosives, which is not only conducive to reducing the dissolution temperature of ammonium nitrate, but also enhances the explosive performance of explosives.

Keywords: expanded ammonium nitrate explosive; inorganic salt; industrial production; dissolution temperature; explosive performance